

## ウォータージェット加工に関する基礎的研究

著者	牛 明 生
号	1896
発行年	1996
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7169">http://hdl.handle.net/10097/7169</a>

氏 名	Niu Ming Sheng 牛 明 生
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 9 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	ウォータージェット加工に関する基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 庄子 哲雄
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 太田 照和 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学教授 松木 浩二 東北大学助教授 福西 祐

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

高速水噴流で金属などの固体材料の加工を行うウォータージェット加工技術は数多くの利点を持っているため、新しい加工法として近年急速に発展しつつある。ウォータージェットによる硬質材料 (例えばステンレス鋼) の加工も可能となり、機械加工の分野に適用されてきつつあるが、加工表面においてノズル送り方向に周期的な縞状粗さが形成されることにより加工精度が低下することが重要な問題となっている。ウォータージェット加工に関する研究としては加工表面特性の測定、加工過程の可視化による研究、砥粒の固体表面への衝突実験に基づく壊食モデルの提案などがある。しかしながら、その加工メカニズムの解明が進んでいないことなどから、縞状粗さの発生を抑える手段を見い出せずにいるのが現状である。

本研究はウォータージェット加工法における加工精度の向上を目指したもので、実験および数値シミュレーションの両面から加工表面に縞状粗さが形成されるメカニズムおよび縞状粗さを低減する方法の検討を行った。そのため、まずウォータージェット加工による切断幅の変化、加工表面の縞状粗さなどを詳細に測定し、次に加工過程の可視化実験によりアブレイブジェットによる加工過程を詳しく観察し、さらに数値シミュレーションにより加工前線の移動、縞状粗さの生成過程および粒子の壊食メカニズムなどを明らかにした。

### 第 2 章 ウォータージェット切断における切断幅の変化

本章では、まずシャドウグラフ法および二重露光影写真法によりジェットの構造を明らかにする目的で、ウォータージェットおよびアブレイブジェットの砥粒の飛行速度及びその分布を測定し、その加速特性を調べた。その結果、砥粒の存在により噴流の乱れが大きくなり、またスタンドオフ距離の増大に伴い砥粒が飛散していくことが確認された。さらにアブレイブジェット内を飛行する砥粒の飛行速度は噴流の軸方向にはほとんど変化せず、ほぼ同一速度を保つことがわかった。またその速度はノズル出口での水の理論計算速度に対して約 60%~80% にまで達していることが確認された。

次にウォータージェットおよびアブレイブジェットに関してノズル送り速度、スタンドオフ距離や材質などが切断幅に与える影響を実験的に検討した。結果として切断幅はノズル送り速度および試片の材質に強く依存することがわかった。ノズル送り速度の違いによって縮小型、等幅型および拡大型の切断幅が得られ、一様な切断幅で高精度に切断する

には条件に応じた最適送り速度が存在することがわかった。最適送り速度はスタンドオフ距離と試片材料強度の増大に伴って小さくなる傾向が見られた。また切断幅の変化が噴流の構造から説明できることを示した。

### 第3章 アブレシブジェットによる加工過程及び加工表面の特性

アブレシブジェット加工における加工表面への縞状粗さの生成メカニズムを解明するため、まずアブレシブジェットによる加工過程をビデオ撮影し、コンピュータ画像処理により詳細に観察した。また加工表面の特性についてもノズル吐出圧力、ノズル送り速度、ノズル傾斜角度などのパラメータの影響を調べた。図1に加工前線の一定時間間隔毎の移動の様子を示す。ノズルに近い位置では加工前線が比較的滑らかに移動するが、深さとともに加工前線が時間的に移動・停滞を繰り返す傾向が大きくなる。この現象を砥粒の加工面へのランダムな衝突により発生する凹みのうち特定スケールの凹みだけが成長していくとする安定性の問題と捉え、その結果加工棚が形成され、それが下の方へ成長しながら移動していくというメカニズムが、加工前線移動の間欠性が深さとともに大きくなる理由であると説明できた。またこの加工前線移動の間欠性による噴流と側壁との接触時間の不均一性が縞状粗さ発生の原因となっていることを指摘した。

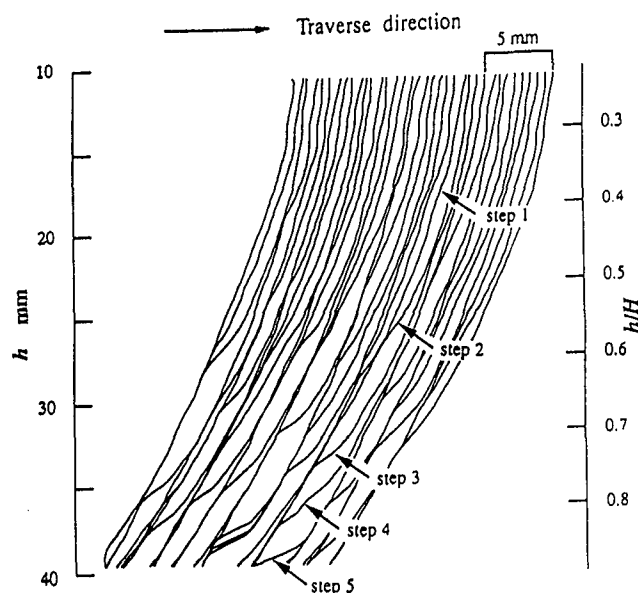


図1 加工前線の移動の様子

( $P=100$  MPa,  $V=30$  mm/min,  $H=45$  mm)

また、従来は加工表面を2つの領域に分けて2種類の加工メカニズムが存在するとする考え方が支配的であったが、本研究においては加工表面の波形解析の結果より、深いところでも浅いところでもほぼ同じ波長に表面波動のピークが存在すること、縞模様およびその原因となる加工棚は上面からすでに存在していることなどを指摘し、全加工深さにわたり同一の加工メカニズムが働いていると考える方が合理的であることを示した。

さらに縞状粗さが砥粒供給量、ノズル吐出圧力およびノズル送り速度などの影響でどのように変化するかを系統的に調べ、縞状粗さを小さく抑えるには、吐出圧力を低くすることとノズル傾斜角度を大きくすることが有効であることを示した。

### 第4章 ウォータージェット加工過程の数値シミュレーション

本章においては、実験では測定が困難である諸量を数値シミュレーションにより求めることで、加工過程を理解する上での手がかりを探す試みを行った。

まずウォータージェットによる加工過程をモデル化し加工表面縞状粗さが発生する様子を数値シミュレーションによりコンピュータ上に再現し、実際の加工現象や加工表面と比較検討を行った。その結果、浅い領域では加工前線がノズル送り方向へ比較的滑らかに進む点、深い領域では移動・停滞を繰り返しながら進んでいく点、加工前線上に加工棚が形成され成長していく点などが再現でき、第3章の可視化実験の結果ともよい一致を見た。これは数値シミュレーションに用いた砥粒の衝突と壁面の壊食とを関係づける計算モデルが基本的に正しいことを示している。

次に粒子が加工表面に衝突するときの粒子運動量のうちの加工表面に対して垂直な成分と平行な成分の壊食量への貢献率が加工深さ方向にどのように変化するかを求めた。図2にその結果を示す。加工深さの全領域にわたり粒子運動量の垂直な成分と平行な成分とは双方とも0ではないことがわかるが、そのうち衝突面に垂直な成分が加工面の壊食への貢献度が支配的であることが確認された。深さを加工到達距離で無次元化すると送り速度、粒子供給量などの条件に関

係なく両成分とも無次元深さ0.1のところで極値をとることがわかった。この計算結果は従来の推測を否定するものである。

さらにアプレシブジェットにおいては砥粒が加工表面に衝突する際に表面で反射し、再衝突を繰り返しながら深い位置まで加工を行うものと考えられるが、それぞれの深さの位置において粒子の第何回目の衝突による寄与が大きいかを数値シミュレーションにより調べた。その結果、試験片上面近くでは直接の衝突が支配的であるが、加工条件に関係なくある相対深さ（約  $h/H=0.18$ ）から第2回目の再衝突による壊食率が第1回目のそれを上回ることがわかった。本数値シミュレーションの結果からも加工表面を2つの領域に分ける必要はないとする考え方の合理性が裏付けられた。

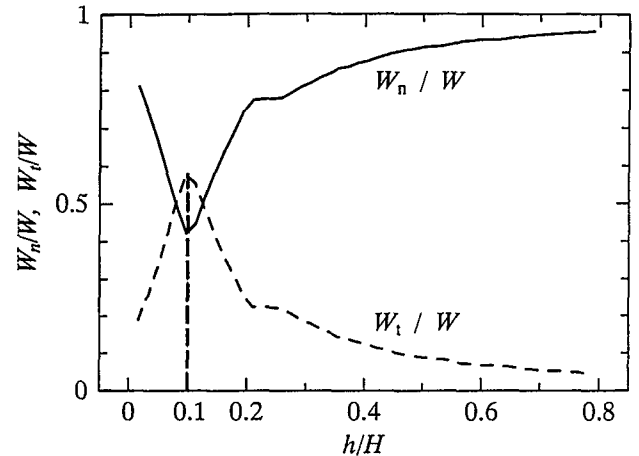


図2 衝突壊食量の垂直な成分と平行な成分の貢献率の変化

## 第5章 結 論

本論文で得られた重要な結果をまとめると次のようになる。

1. ウォータージェット加工による切断幅を一定にする最適な送り速度が存在することがわかった。
2. 加工過程の可視化により加工前線の移動・停滞および加工棚の生成・進展の様子などが観察できた。加工棚および縞状粗さの形成メカニズムを明らかにした。
3. 加工表面特性に送り速度の影響は少なく、低い吐出圧力および大きなノズル傾斜角度を用いることで縞状粗さを小さくできることを示した。
4. 数値シミュレーションの結果として得られた加工前線進展の様子及び加工到達距離等は実験結果とよく一致した。したがって数値シミュレーションに用いた計算モデルが基本的に正しいことが示された。
5. 粒子運動量の衝突面に垂直な成分と平行な成分の壊食への貢献率および粒子の衝突回数毎の壊食への寄与などを求めた数値シミュレーションにより求めた結果から、加工面の壊食には衝突面に垂直な成分が主な役割を担っており、また送り速度や粒子供給量などに関係なく無次元深さ0.1で極値をとることが示された。
6. 実験および数値シミュレーションの結果によりアプレシブジェットによる壊食メカニズムは全深さにわたり同一であり、従来のように2つの領域に分けて考える必要のないことが示された。

## 審査結果の要旨

高速水噴流により金属などの固体材料を加工するウォータージェット加工技術は新しい加工法として急激に発展しつつある。しかしながら、その加工メカニズムの解明が進んでいないことなどから、加工表面に周期的な縞状粗さが発生するなどの問題点が克服できずに課題として残されている。

本論文は、加工メカニズムの解明および加工精度を向上させる方法の開発を、切断加工実験及び数値シミュレーションによりとり行った研究の成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、アブレシブジェット加工における切断幅が、加工条件によって深さ方向にどのように変化するかを各種試片に関して実験的に調べている。そして切断幅が噴流の構造、砥粒の飛行速度、砥粒の分布などの影響を受けること、さらに各条件下で切断幅が等しくなる最適送り速度が存在することを明らかにしている。これは実用面において有用な知見である。

第3章では、アブレシブジェット加工において加工表面に縞状粗さが形成されるメカニズムを明らかにするため、アブレシブジェットによる加工過程をビデオ撮影により詳細に観察している。また、各種条件下で切断加工実験を行い、加工表面の凹凸の測定および波形特性の解析を行っている。その結果、加工棚が形成され成長しながら移動して行くことで加工前線が移動・停滞を繰り返すこと、またその過程が縞状粗さ発生の原因となっていることを明らかにしている。さらに、縞状粗さが砥粒供給量、ノズル吐出圧力、ノズル送り速度などの影響でどのように変化するかを系統的に調べ、縞状粗さの発生を抑制・低減する方法を提案している。これらは工学的に重要な知見である。

第4章では、加工過程のモデルを考案し、それに基づいた数値シミュレーションを行い、アブレシブジェットによる切断加工過程、特に加工表面に縞状粗さが発生する過程を再現することに成功し、また実験結果との比較検討を行っている。また粒子の運動エネルギーの加工表面に対する垂直成分と平行成分の壊食への貢献率および粒子の直接衝突やくり返し衝突の壊食への貢献度も求めている。これらの結果をもとに加工メカニズムについての新しい解釈を提案している。これは今後のウォータージェット加工精度を飛躍的に向上させる可能性を持つ重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、実験と数値シミュレーションの両面から、ウォータージェット加工において加工表面に縞状粗さが形成されるメカニズムおよびそれを低減する方法を明らかにし、加工メカニズムに関して新しい提案を行ったものであり、機械工学およびウォータージェット加工技術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。